Bedienungsanleitung

Version: 19/08/11

ku-pf Apparatur

Inhalt

1. Messprinzip 3
2. Technische Daten 3
3. Pysikalische Grundlagen 4
4. ku-pF Apparatus DT 04-01 5
5. Messvorbereitung 6
5.1. Entlüftung der Tensiometer 6
5.2. Kalibrierung der Tensiometer 7
5.3. Kontrolle der Nullpunktdrift 9
6. Probenvorbereitung 10
7. Versuchsdurchführung 11
7.1. Neues Projekt anlegen 11
7.2. Messungen beginnen 12
7.3. Funktionen 13
7.4. Grafikmenü 15
7.5. Tool- Fenster 16
8. Optimierung des Versuchlaufs 17
9. Erfassung der Messdaten 18
10. Auswertung 19
11. Literatur 23
12. Hinweise 24

Autor: Dr. rer. nat. Jürgen Punzel (UGT GmbH)
Co-Autor: Jens Berding (TU Cootbus)

1. Messprinzip

Die ku-pF-Apparatur dient der Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit (ku) und der pF-Kurve von Bodenproben im ungesättigten Bereich mit einem Messverfahren nach SCHINDLER (1980).

Dazu werden Bodenproben im Stechzylinder vollständig aufgesättigt und anschließend basal abgedichtet. Die freie Oberfläche wird der Verdunstung ausgesetzt und der Gradient der entstehenden Wasserbewegung messtechnisch erfasst.

Mit dem ku-pF-Apparat können bis zu 10 Bodenproben gleichzeitig untersucht werden, da die Stechzylinder auf einen sternförmigen Probenwechsler gesetzt und mit einem geeigneten Zeitintervall periodisch über eine Waage geführt werden. Mittels dieser Wägung wird die im festgelegten Zeitintervall durch die Probenoberfläche strömende Wassermenge (Wasserbewegung) bestimmt.

Der Gradient der Wasserspannung wird in jedem Stechzylinder durch zwei im Abstand von 3cm eingebaute Tensiometer ermittelt. Deren Werte werden mit dem Zeittakt der Wägung erfasst. Die Versuchssteuerung und primäre Datenaufzeichnung führt ein integrierter Prozessrechner aus. Die Kommunikation mit dem Prozessrechner erfolgt über einen PC.

2. Technische Daten

Stechzylindervolumen	250 cm^3
Querschnitt der Stechzylinder	41 cm^2
Probenanzahl	1 - 10
Zykluszeit der Datenerfassung	10 - 40 min
Auflösung der Wägung	0,01 g
Tensionsbereich	0 - ca. 90 kPa
Gewicht der Anlage	ca. 40 kp
Abmessungen (LxBxH)	ca. 100x70x40 cm
Stromaufnahme	230V / 1A
PC-Anschluss	serielle Schnittstelle (115200 Baud)
Messposition der Tensiometer	an Wägeposition
Speicherkapazität	210 bis 840 Tage

3. Pysikalische Grundlagen

Die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenproben kann nach der DARCY-Gleichung unter Annahme quasistationärer Fließbedingungen berechnet werden. Zur Gültigkeit dieser Annahme siehe **(2)**. Dabei wird der *hydraulische Gradient* in der Stechzylinderprobe jeweils als *konstant über der Probenlänge* angenommen. Der Gradient wird aus dem Matrixpotential (Tensiometermessung) und dem Gravitationspotential gebildet:

$$v_z = k * \frac{\Delta\varphi}{\Delta z}\ (DARCY) \qquad \textbf{(1)}$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta z} = \frac{\Psi_t - \Psi_b}{\Delta z} \qquad \textbf{(2)}$$

vz Fließgeschwindigkeit der Wasserbewegung

k hydraulische Leitfähigkeit

j hydraulisches Potential

z Ortskoordinate

Yt Tension des oberen Tensiometers (als positiver Druck im ungesättigten Bereich)

Yb Tension des unteren Tensiometers

Dh Gravitationspotential als Ortshöhe

Infolge der Verdunstung wird an der freien **Probenoberfläche** eine Fließgeschwindigkeit vt ausgebildet. Die basale Abdichtung der Probe bewirkt an der unteren Grenzfläche die Fließgeschwindigkeit vb = 0.

Für die **Probenmitte** zwischen den Tensiometerpositionen kann unter quasistationären Fließbedingungen gesetzt werden:

$$v_m = \frac{1}{2}(v_t - v_b) = \frac{\Delta V}{2 * A * \Delta t} \qquad \textbf{(3)}$$

vm Fließgeschwindigkeit in Probenmitte

DV in der Zeit Dt verdunstetes Wasservolumen

Dt Meßintervall an Einzelprobe (Tastzeit*10)

A Querschnitt des Stechzylinders

Für den Probenbereich zwischen den Tensiometern gilt dann:

$$k = \frac{\Delta V}{2 * A * \Delta t} * \frac{\Delta z}{\Psi_t - \Psi_b - \Delta h} \quad \textbf{(4)}$$

Dz Abstand der Tensiometer im Stechzylinder (=3 cm)

Dh Differenz der Ortshöhen zwischen den Tensiometerpositionen (=3 cm)

Die **hydraulische Leitfähigkeit ist eine Funktion des Wassergehaltes** der Probe. Zu seiner Bestimmung muß nach dem Versuchslauf das Trockengewicht der Bodenproben ermittelt werden. Für die **pF-Kurve** wird der aktuelle Wassergehalt der Probe jeweils dem Mittelwertaus beiden Tensiometerwerten zugeordnet.

4. ku-pF Apparatus DT 04-01

Der Probenwechsler bildet das Grundgerät der ku- pF Apparatur DT 04-01. Er besteht aus einem sternförmigen Drehkreuz für die Aufnahme von 10 Probenhaltern. Die Probenhalter tragen jeweils eine Stechzylinderprobe und sind mit je zwei Tensiometern und einer elektronischen Baugruppe ausgestattet, welche die Tensiometerwerte digitalisiert und über eine Zweidrahtleitung an den Datenlogger sendet.

Die Verbindung zum Datenlogger erfolgt über Kontakte in den Aufnahmekegeln am Drehkreuz. Während des Verdunstungsversuches werden die einzelnen Probenhalter periodisch im gewählten Zeittakt an die Messposition geführt, um zunächst die Tensiometerwerte an den Datenlogger zu übertragen.

Anschließend erhält die Waage den Befehl „rezero“. Durch Anheben der Waage wird der Probehalter aus seiner Halterung geschoben und auf der Waage abgestellt. In dieser Position wird das Gesamtgewicht des Probenhalters ermittelt und an den Datenlogger übertragen. Beim Absenken der Waage nimmt das Drehkreuz den Probenhalter wieder auf und der Messtakt einer Probe ist beendet.

5. Messvorbereitung

Da bei den Tensiometern gegen Versuchsende und infolge der Verdunstung an der freien Oberfläche der Lufteintrittspunkt überschritten werden kann, sind diese vor jedem weiteren Versuchslauf zu entlüften und die Kalibrierung zu kontrollieren. Selbiges gilt, wenn die Apparatur längere Zeit ungenutzt ist und die Keramiken der Tensiometer austrocknen. Zur Überbrückung derartiger Messpausen empfiehlt sich die Lagerung der Tensiometer in den mit bi-destilliertem Wasser gefüllten Transporthülsen (Lieferumfang).

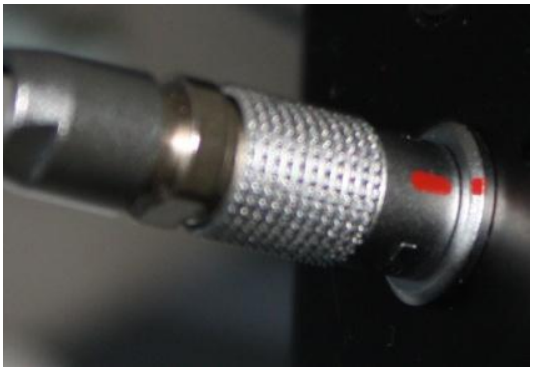
5.1. Entlüftung der Tensiometer

Die Tensiometer werden aus der Aufnahmehülse entnommen und die Entlüftungsschraube entfernt. An ihrer Stelle wird eine Schlaucholive eingeschraubt und eine Verbindung zur Handvakuumpumpe hergestellt. Befindet sich das Tensiometer in einem wassergefüllten Behälter, kann über die Vakuumpumpe (bi-) destilliertes Wasser in eine Vakuumflasche angesaugt und dabei die Luft aus dem Tensiometer entfernt werden. **Achtung! Es darf kein Wasser in die Pumpe gelangen!** Restblasen durch Schwenken des Tensiometers zur Olive bewegen. Nach Entfernen der Schlaucholive wird eventuell eingeschlossene Luft mit der Spritze (Lieferumfang) evakuiert und die Anschlussbohrung mit Wasser gefüllt. Nachfolgend muss die Entlüftungsschraube blasenfrei eingesetzt werden. **Achtung! Schraube langsam eindrehen und Kompressionsdruck vermeiden!** Die Tensiometer in die offenen Aufnahmehülsen einführen und diese vollständig mit Wasser füllen.

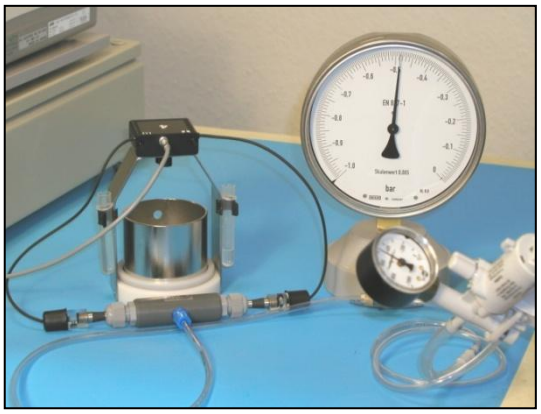
5.2. Kalibrierung der Tensiometer

Zum Kalibrieren nehmen Sie den jeweiligen Probenhalter vom Tragarm und stellen mittels beigelegtem Kabel eine Verbindung zum ku- pF- Apparat DT 04-01 her.

Beim Anschließen ist auf die richtige Steckposition zu achten (rote Markierung).



Die vollständig befüllten Tensiometer werden in die Druckhülse eingeführt, dort fixiert und anschließend **waagerecht** gelagert.



Stellen Sie nun eine Verbindung des Apparates mit der Software durch den Button

her.

Im Kalibriermenü werden die aktuellen Messwerte der Tensiometer online gelesen, und die vollständige Kalibrierung über den Nullwert (zero) und den Referenzwert (reference value) kann durchgeführt werden.

Das rote Kästchen zeigt die Nummer des aktuellen Probenhalters. Sobald die Kalibrierung der Tensiometer abgeschlossen ist wechselt der Hintergrund von "rot" zu "grün".

Unter entspannten Druckverhältnissen müssen beide Tensiometer in waagerechter Messposition 0.0 – 0.1 kPa anzeigen.

Der Wert kann durch Betätigen des Buttons Zero auf "Null" gesetzt werden.

Bei Abweichungen vom Nullwert drehen Sie vorsichtig die Befüllschraube heraus und wiederholen den Kalibriervorgang. Die Messung gegen die Atmosphäre muss den Wert 0 kPa anzeigen. Anderenfalls wurde der Nullpunkt falsch kalibriert, das Tensiometer ist defekt oder es liegt ein Elektronikfehler vor. Überprüfen Sie die gasfreie Befüllung bzw. kontaktieren Sie die UGT GmbH.

Zur Kalibrierung des Referenzwertes erzeugen Sie mittels Handpumpe einen Unterdruck von –50 kPa und vergleichen diesen mit der Anzeige im Kalibrierungsmenü.

Bei Übereinstimmung speichern Sie den Referenzwert mit dem Button Referenz.

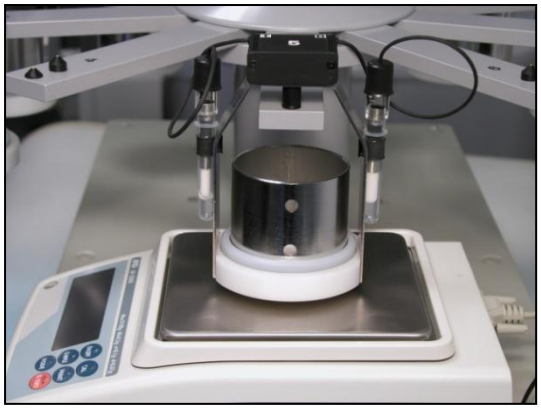
Zur Überprüfung der Kalibrierung wird ein beliebiger Druckwert in der Adapterhülse gewählt. Die Online-Darstellung muss synchron und im Verhältnis zur Handpumpenbetätigung reagieren. Nach der Belüftung der Handpumpe sollte der Wert auf 0 kPa zurückfallen.

Die vollständig gefüllten Tensiometer stehen anschließend in den ebenfalls vollständig gefüllten, offenen Aufnahmehülsen zur Installation bereit. In dieser Stellung ist am Drucksensor des Tensiometers eine hängende Wassersäule von ca. 2cm wirksam. Der Toleranzbereich der angezeigten Werte schwankt zwischen –0,2 bis –0,6 kPa.

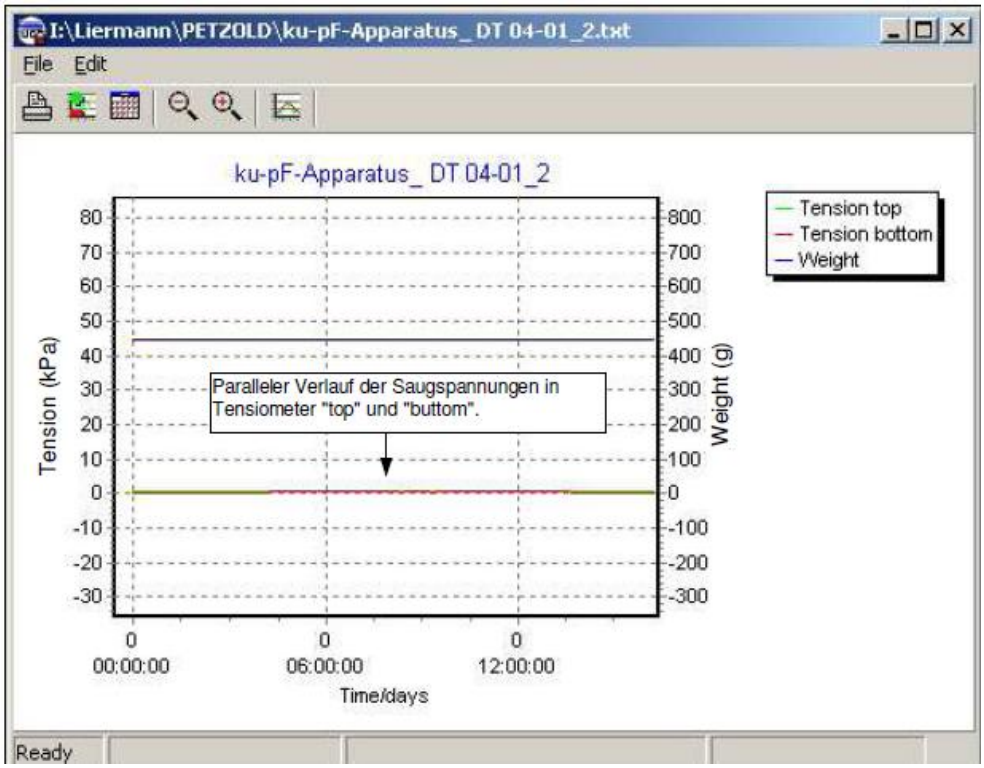
5.3. Kontrolle der Nullpunktdrift

Um fehlerhafte Messungen zu vermeiden kontrollieren Sie bitte im Anschluss an die Entlüftung und Kalibrierung der Tensiometer und vor der Installation der Bodenproben die Nullpunktdrift der Tensiometer. Dieser Arbeitsschritt kann während der Aufsättigung der Bodenproben (Dauer ca. 12 Stunden) durchgeführt werden.

Setzen Sie die Körbe ohne Bodenproben auf das Drehkreuz und starten Sie ein neues Projekt. Die Tensiometer stecken in den mit (bi-) destilliertem Wasser gefüllten Transporthülsen.



Lassen Sie den Versuch mindestens 12 Stunden laufen. Bei funktionstüchtigen Tensiometern ergeben sich parallele Graphen auf der Nulllinie.



6. Probenvorbereitung

Die Probenahme erfolgt in 250 cm³ Stechzylindern, die seitlich jeweils 2 Bohrungen zur Aufnahme der Tensiometer enthalten. Diese Bohrungen sollten ab der Probenahme bis zur Aufsättigung mit Klebeband verschlossen werden. Zur Aufsättigung die Stechzylinder mit der Schneidkante auf die mit Filterpapier ausgelegten Siebplatten stecken.

Mit einem dünnen Wasserstrahl (Spritzflasche) werden die Bohrungen in der Siebplatte bei gewendeter Probe gefüllt und die Proben mit teilweise aufgelegtem Deckel zunächst bis zur Oberkante der Siebplatte in das Sättigungsbad gestellt. Nach ca. 12 Stunden kann der Überstau bis zur Probenmitte für mindestens weitere 12 Stunden erhöht werden. Nach mindestens 24 Stunden Sättigungszeit werden die Proben aus dem Wasserbad entnommen und für einige Sekunden zum Abtropfen auf ein Filtertuch gestellt, um das überschüssige Wasser aus den Siebbohrungen zu entfernen. Nach dem Abnehmen der Abklebungen werden die Tensiometeröffnungen mit der Bohrvorrichtung bis zum Anschlag des zugehörigen Bohrers (Tensiometerlänge) ausgebohrt. Dabei sollte der Deckel angedrückt werden, um ein Ausbrechen der Probe zu verhindern. Die aufgesättigten und gebohrten Proben werden mit Siebplatte aber ohne Deckel und ohne Lochfolie gewogen:

$$M_{si} = Probe\ (gesättigt) + Stechzylinder + Siebplatte + Filterpapier\ (nass)$$

i Probennummer

Zum Einsetzen der Bodenproben werden die Probenhalter abgenommen und die Proben mit der Siebplatte in die Grundplatte des Probenhalters eingedrückt. Die Tensiometeröffnungen zeigen dabei nach innen. Anschließend den Stechzylinderdeckel mit Lochfolie aufsetzen.

Die Tensiometer aus den Aufnahmehülsen nehmen und in den Bohrungen der Stechzylinder installieren (top- oben; bottom – unten). Dabei ist auf einen ausreichenden kapillaren Anschluss zu achten (evtl. Anbindung mit Schluffmehl). Ein Ausbrechen der Bodenprobe am oberen Tensiometer kann durch Andrücken des Deckels verhindert werden. Die Tensiometer sollten bis zum Anschlag des Dichtungsringes am Tensiometerschaft eingedrückt werden. Erreicht der Dichtungsring nicht den Stechzylinder, so muss der verbleibende Spalt zusätzlich abgedichtet werden (Silikon, Kautschuk).

Die Aufnahmehülsen der Tensiometer werden vom Probenhalter abgenommen (Verdunstung) und die Probenhalter entsprechend der Nummerierung eingehängt.

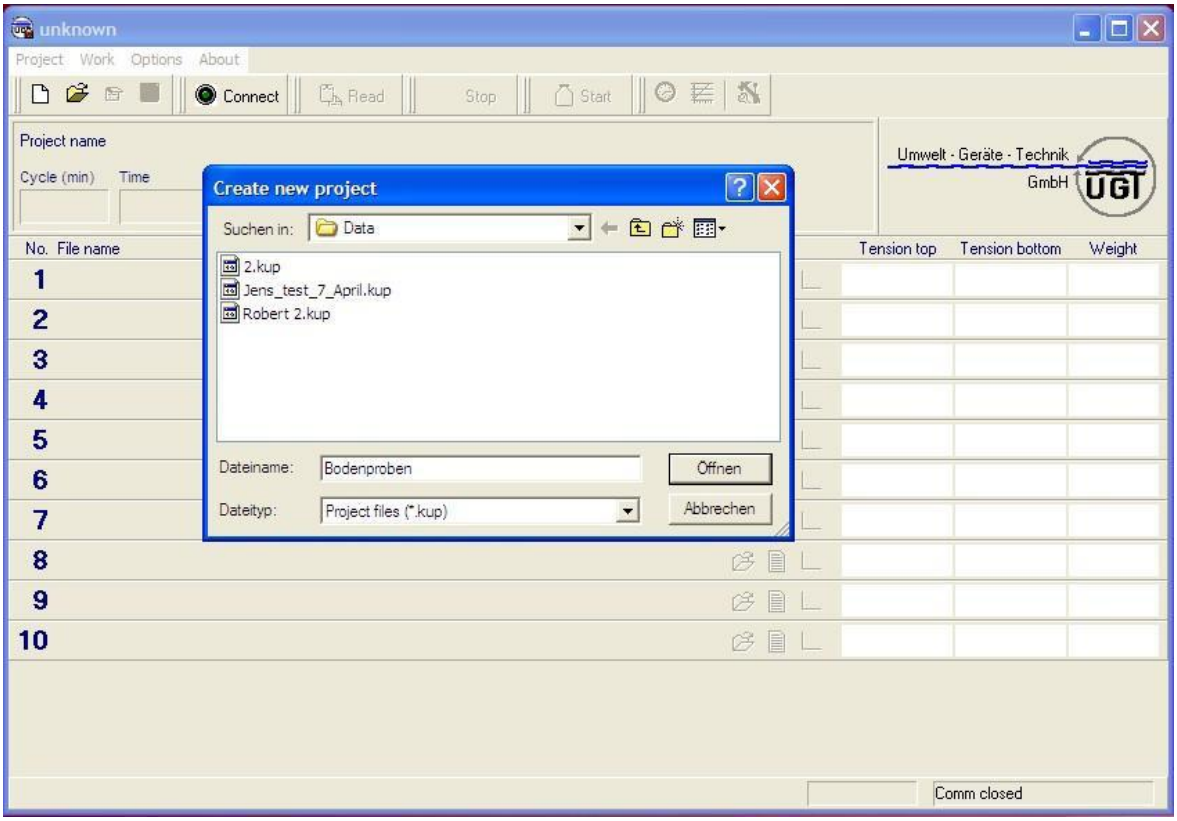
Nach Installation der Proben sollte überprüft werden, dass der Probenwechsler die nötige Bewegungsfreiheit besitzt, keine Gegenstände unter den Hubtisch gelangen können und die Tensiometerkabel an der Wägeposition den Arm der Aufhängung nicht berühren. Mit dem Tool "TURN" kann eine Proberunde gesteuert werden.

7. Versuchsdurchführung

7.1. Neues Projekt anlegen

Öffnen Sie die Software "KupF- Apparat" und legen Sie ein neues Projekt durch Drücken von an.

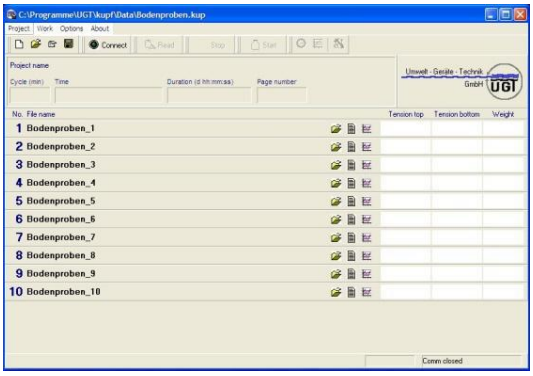
Benennen Sie Ihr Projekt (hier: "Bodenproben") und öffnen Sie das Projekt.



Den 10 Körben werden 10 Dateien vom Typ ".TXT" zugeordnet.

Über den Button können ergänzende Probenbezeichnungen, Standortkriterien oder Auffällig- keiten bei der Aufsättigung bzw. der Installation der Tensiometer eingetragen werden.

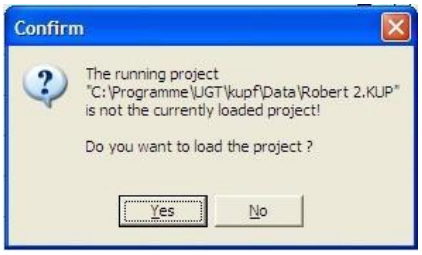
Wenn Sie die Messungen nicht sofort beginnen möchten, können Sie das Projekt über speichern und später verwenden.



7.2. Messungen beginnen

Über den Button

verbinden Sie die Software mit dem Apparat.



Sie werden nun evtl. darauf hingewiesen, dass im Speicher des Apparates noch ein älteres Projekt vorhanden ist. Um das neu angelegte Projekt in den Speicher des Apparates zu laden, drücken Sie "NO".

Wenn Sie das bereits bestehende Projekt (hier: "Robert 2.kup") aus dem Speicher des Apparates öffnen wollen, drücken Sie "YES". Sie können dieses Projekt über nun speichern. Nach dem Speichern drücken Sie um das bereits vorhandene Objekt zu schließen und die Verbindung zu trennen.

Öffnen Sie anschließend das neu angelegte Projekt und verbinden Sie wieder Software und Apparat über

.

Wählen Sie im Tool-Menü die Zykluszeit in Minuten. Beachten Sie dabei, dass die Verdunstungsleistung entsprechend der Bodenart zu einer unterschiedlichen Versuchsdauer führen kann.

- Tonböden (Versuchsdauer kurz) - kleine Taktzeit
- Sandböden (Versuchsdauer mittel bis lang) – mittlere Taktzeit

Beginnen Sie die Messungen durch

.

Sie werden gewarnt, dass dadurch alle gespeicherten Daten des Projektes überschrieben werden. Stimmen Sie dem mit "YES" zu.

Danach erscheint eine zweite Warnmeldung, die Sie daran erinnert, die Aufnahmehülsen der Tensiometer von den Körben abzunehmen. Klicken Sie auf "OK". Die Messungen beginnen nun bis sie unterbrochen werden. Die Versuchszeit fängt nun wieder bei "0" an.

Sie können das Programm schließen, die Messungen werden auch bei getrenntem PC durchgeführt. Wenn Sie die Messungen beenden möchten, drücken sie und schalten Sie den ku- pF- Apparat am Kippschalter aus.

7.3. Funktionen

New Erzeugt ein neues Projekt.

Open Öffnet ein bestehendes Projekt und stellt die zugehörigen Dateien bereit. Die bestehenden Daten können in der Grafik angesehen werden.

Close Schließt ein geöffnetes Projekt und beendet gleichzeitig die Verbindung zum ku-pF Apparat DT 04-01.

Save Speichert das geöffnete Projekt. Hat keinen Einfluss auf die Dateien.

Stellt die Verbindung zum ku-pF Apparat DT 04-01 her. Läuft im ku- pF-Apparat DT 04-01 ein Projekt und ist kein Projekt in der Software geöffnet, (oder stimmt das geöffnete Projekt nicht mit dem laufenden überein) wird das laufende Projekt im aktuellen Verzeichnis und im Standardverzeichnis gesucht.

Ist es vorhanden, wird es mit Nachfrage geöffnet. Ist es nicht vorhanden, erscheint eine Meldung mit den Optionen:

- Selbst nach dem Projekt suchen
- Ein neues Projekt mit dem Namen des laufenden Projektes erzeugen.

Die Verbindung zum ku-pF- Apparat wird unterbrochen. Durch CONNECT wird die Verbindung wieder hergestellt.

Alle Daten werden ausgelesen und in eine Datei mit dem Namen Projektname +“000n“ und der Erweiterung „TMP“ geschrieben. Verläuft das Auslesen fehlerfrei werden die Daten anschließend in die den Körben zugeordneten Datendateien geschrieben.

Sie können sich nun die aktuellen Messwerte in den Grafiken ansehen.

Unterbricht bzw. beendet einen laufenden Versuch. Die Kommandos CONTINUE, START, CLOCK, KALIBRIERUNG und TOOLS werden freigegeben. Stoppen Sie nur, wenn die Waage heruntergefahren ist.

Der unterbrochene Versuch wird fortgesetzt.

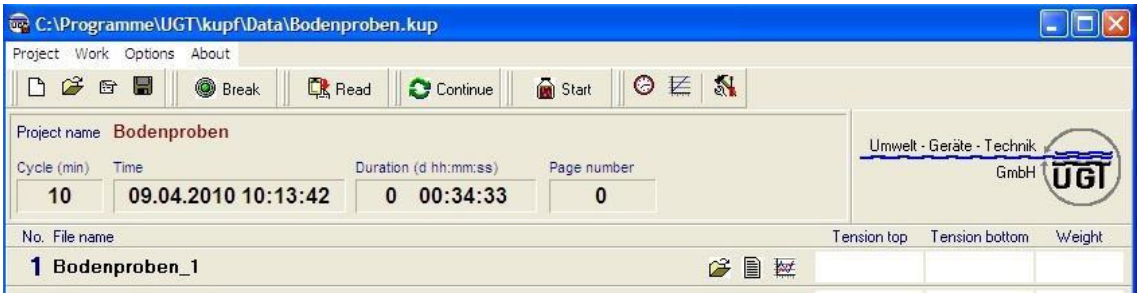
Ein **neuer** Versuch mit den Daten des geöffneten Projekts wird gestartet. Die Startzeit wird in der Projektdatei gespeichert und zur Anzeige der Versuchsdauer benutzt.

Clock — Die ku- pF- Uhr wird auf die PC-Zeit gesetzt.

Kalibrierung — Der ku- pF- Apparat DT 04-01 wird in den Kalibriermodus geschaltet und das Kalibrierfenster geöffnet.

Tools — Das Tool-Fenster wird geöffnet. Die Zykluszeit kann verändert, die Waage angehoben und das Drehkreuz gedreht werden.

Im Hauptmenü sind jedem Korb drei Kommandotasten zugeordnet:



Open — Öffnet eine Datei zur Abspeicherung der gelesenen Daten bzw. ermöglicht den Import einer separaten Datei im ".TXT"-Format.

Achtung: Beim Import wird die bestehende Datei überschrieben.

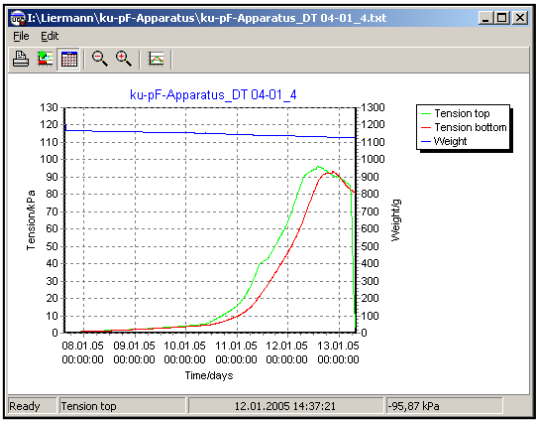
Text — Erlaubt die Eingabe von Text zur näheren Beschreibung der Probe.

Grafik — Zeigt die Daten als Grafik an.

Ein Rechts-Click auf den Dateinamen erlaubt das Löschen des Dateinamens (nicht der Datei) wenn der Korb nicht besetzt ist.

7.4. Grafikmenü

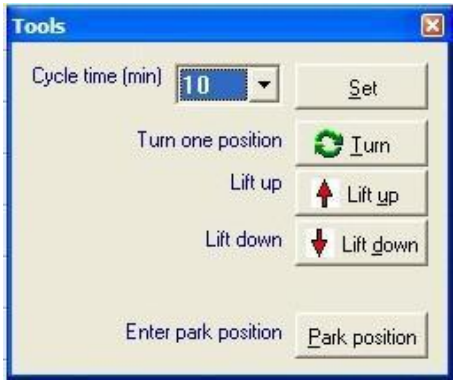
Es können mehrere Grafikfenster zur gleichen Zeit geöffnet sein. Werden bei geöffnetem Fenster Daten gelesen, werden diese erst nach dem Schließen und erneutem Öffnen angezeigt.



Print	Druckt die Grafik. Die Grafik wird auf die Größe des Blattes formatiert.
Print install	Drucker einrichten.
Add/Remove	Einzelne Kurven können aus der Grafik entfernt bzw. hinzugefügt werden.
Calender	Auf der X-Achse werden das Datum und die Uhrzeit dargestellt. Ist die Taste nicht gedrückt, wird die Versuchsdauer auf der X-Achse dargestellt.
Undo Zoom	Nimmt die Vergrößerung auf die im Zoom- Fenster eingestellten Werte zurück.
Zoom	Öffnet ein Fenster zum Einstellen der Anzeigebereiche.
Points	Zeigt ein kleines Viereck für jeden Messwert.
Copy	Speichert eine Kopie der Grafik als Bitmap oder Metafile in der Zwischenablage. Von da kann sie in andere Programme z.B. Word eingefügt werden.
Mit der Maus sind folgende Funktionen ausführbar:	
Zoom	Linke Maustaste auf der linken oberen Ecke des Zoombereiches drücken und mit gedrückter Taste ein Rechteck bis zur rechten unteren Ecke des gewünschten Zoombereiches ziehen.
Undo Zoom	Linke Maustaste drücken und mit gedrückter Taste ein Fenster nach links oben ziehen.
Horiz. Scrollen	Rechte Maustaste auf die Grafik klicken und mit gedrückter Taste die Grafik nach links bzw. rechts scrollen.
Wert anzeigen	Punkte einschalten und mit der linken Maustaste auf den gewünschten Messwert klicken. Zeitpunkt und Messwert erscheinen in der Statusleiste.

7.5. Tool- Fenster

Neben der Betätigung der Buttons mit der Maus können folgende Tasten verwendet werden:



S	Zykluszeit setzen
T	Drehung des Drehkreuzes
U	Waage heben D Waage senken
P	Parkposition
ESC	Fenster schließen

Mit der Zykluszeit können variable Abtastraten je nach zu erwartender Versuchsdauer und in Abhängigkeit von der gewählten Bodenart eingestellt werden.

Die Parkposition der Waagenplattform dient dem Transportschutz und sollte nur zu selbigem Zwecke angewandt werden. Bei erstmaliger Inbetriebnahme fährt die Waage in Messposition nachdem der Button "Lift up" zweimal betätigt wurde.

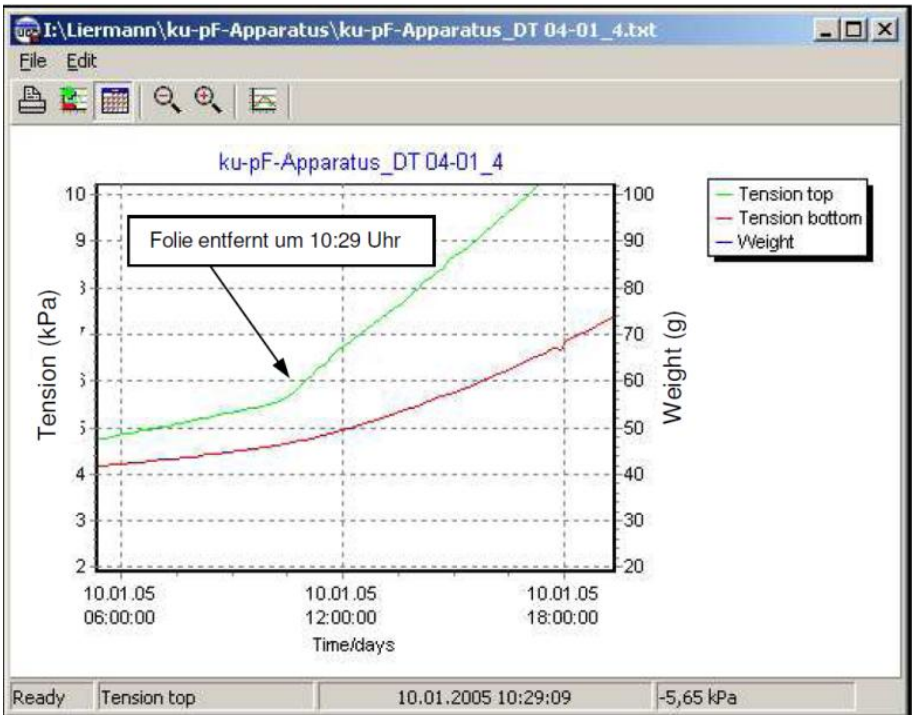
8. Optimierung des Versuchlaufs

Ein Versuchslauf sollte stets mit den abgedeckten Bodenproben gestartet werden. Unter diesen Bedingungen ist die Fließgeschwindigkeit Null und die Druckdifferenz an den Tensiometern beträgt ca. 0,3 kPa (Ortshöhe Dh=3cm bei v=0 nach Gl.2).

Nach ca. 3 Stunden sind diese Startwerte mit ausreichender statistischer Sicherheit aufgezeichnet. Die Deckel können von den Proben entfernt werden. Im Grafik-Menü wird der Massenverlust angezeigt. Mit dem Einsetzen der Verdunstung beginnt der Wasserfluss durch die Proben.

Im Hauptmenü werden während des Versuches die aktuellen Versuchsdaten angezeigt. Für eine optimale Versuchssteuerung sollte die Differenz der Wasserspannungen (Gradient) in einer Probe den Betrag von ca. 5kPa nicht übersteigen. Diese Differenz kann durch Variation der aktuellen Verdunstungsrate an der Probenoberfläche gesteuert werden. Dafür ist die Probenoberfläche mit einer Lochfolie teilweise abgedeckt. Bei vollständiger Abnahme der Lochfolie sollte diese am Probenhalter verbleiben und ihr Gewicht mit erfasst werden.

Am Kurvenverlauf der Spannungen sind die Maßnahmen des Verdunstungsschutzes nachvollziehbar. Ergänzend dazu sollten entsprechende Kommentare in das Textfeld eingetragen werden.



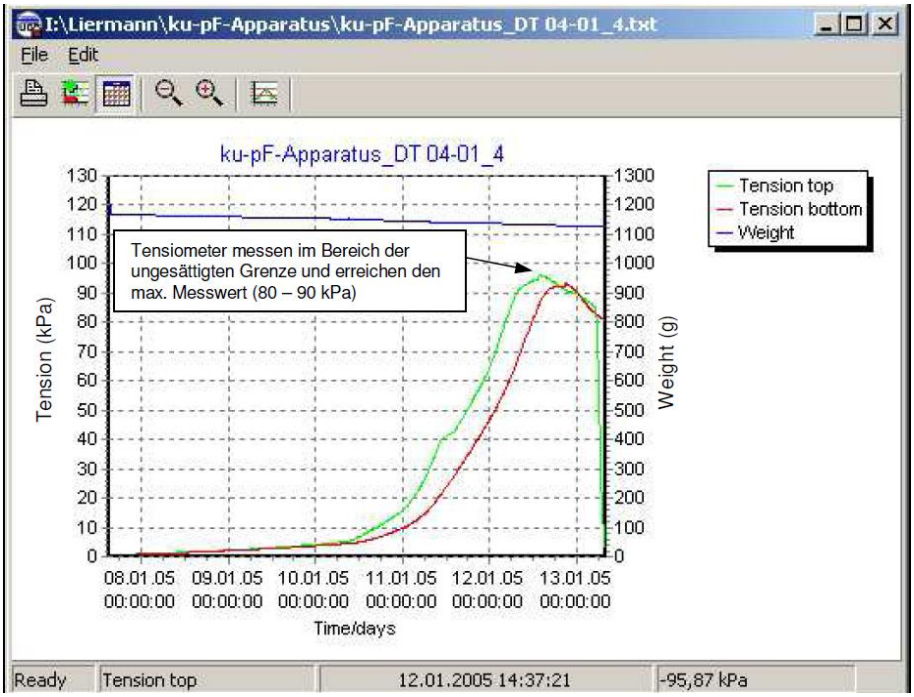
Bei Klick auf einen Datenpunkt werden in der unteren Menüleiste das Tensiometer, die Messzeit und der Messwert angezeigt.

9. Erfassung der Messdaten

Im laufenden Versuchsbetrieb können die Messdaten auf den angeschlossenen PC mit „READ“ übernommen und online dargestellt werden. Die grafische Darstellung entspricht immer dem letzten Auslesetermin.

Stellen Sie über "Connect" die Verbindung zum ku- pF- Apparat DT 04-01 her. Das aktuelle Projekt wird geladen und die Daten können ausgelesen werden.

Im Grafik-Menüs kann der Fortschritt der Verdunstung kontrolliert und ein mögliches Versuchsende abgeschätzt werden.



Die ungesättigte Grenze entsteht bei Annäherung des oberen Tensiometers ("top") an seine Messgrenze (80 – 90 kPa). Dabei wird die Kurve konkav, d.h. der Anstieg verringert sich und wird beim Maximum (Tensiometergrenze) Null. In dem Bereich vor dem Maximum setzt die Belüftung der Tensiometer ein (Freisetzung gelöster Luft, Ausdehnung von Luftblasen). In unmittelbarer Umgebung der Tensiometer wird durch Abgabe von Wasser der Anstieg der Wasserspannung vermindert. Dieser verminderte Anstieg der Tensionskurve ist durch das Messprinzip der Tensiometer und die geringe Leitfähigkeit der Proben bei der Abführung des Wassers aus dem Tensiometer zu erklären.

10. Auswertung

Zur vollständigen Auswertung der Versuche sollte der Datensatz in ein Tabellenkalkulationssystem (z.B. Excel) übertragen werden.

Diese vollständige Auswertung beinhaltet:

- einen Plausibilitätstest der aufgezeichneten Messwerte eventuell mit einer Korrektur der Tensiometerwerte,
- die Berechnung der Gradienten der Wasserbewegung, der ku-Werte und der aktuellen Wassergehalte.

Dafür werden in die Tabelle eingefügt:

- Spalte für Versuchsdauer in Minuten
- Spalte für die Differenz der Tensionen (korrigiert)
- Spalte für gleitendes Mittel der Differenz der Tensionen
- Spalte für den Gradienten der Wasserbewegung
- Spalte für den Wassergehalt
- Spalte für die pF-Stufe
- Spalte für die Fließgeschwindigkeit
- Spalte für die Leitfähigkeit ku

Versuchsdauer in Minuten:

Entsprechend der bei Versuchsstart gewählten Abtastrate (Zykluszeit) ist die Zeitdauer zwischen den Einzelmessungen einer Probe 10 bis 40 min. Die Zeitspalte wird mit der entsprechenden Zeitreihe automatisch gefüllt.

Differenz der Tensionen:

Beim Versuchsstart sind die Bodenproben mit dem Deckel verschlossen, die Fließgeschwindigkeit ist Null. Entsprechend Gl. 1 und 2 müsste die Differenz der Tensiometerwerte 3cmWS oder 0,3kPa betragen. Abweichungen von diesem Sollwert (Drift der Tensiometer) werden mit einer Korrektur K beschrieben:

$$TensN1 - TensN2 + K = 0{,}3\ (kPa)$$

Der Korrekturwert K wird aus den aufgezeichneten Tensiometerwerten jeder Probe vor Abnahme der Deckel ermittelt.

Die Spalte Differenz der Tensionen (korrigiert) enthält die aktuellen Werte:

$$D\text{-}TensN = TensN1 - TensN2 + K$$

Gleitendes Mittel für Differenz der Tensionen:

Wurde der Zeitschritt beim Versuchsstart zu klein gewählt, sind auch die Änderungen der Messwerte gering. Parameter aus Differenzen dieser Werte können große Sprünge aufweisen. Eine gleitende Mittelwertbildung glättet diese Messreihen:

D-TensN(m) = Mittelwert (Sz - 1; Sz + 1)

S = Spalte der Reihe D-TensN ; z = aktuelle Zeile

Gradienten der Wasserbewegung:

Nach Gl. 2 erhält man den Gradienten (cmWS/cm) aus dem jeweiligen Spaltenwert der Differenz der Tensionen:

GR = D-TensN(m)/0.3 – 1

Wassergehalt:

Der aktuelle Wassergehalt der Probe i wird aus dem Anfangsgewicht der Probe, ihrem Trockengewicht und der Gewichtsänderung im Versuchslauf bestimmt. Das Gewicht der gesättigten Probe Msi wurde vor Installation der Tensiometer ermittelt. Zur Bestimmung des Trockengewichtes werden bei Versuchsende die Tensiometer entfernt und die Proben mit Siebeinsatz aus der Halterung gehoben.

Die Kittreste am Stechzylinder sind zu entfernen. Die Stechzylinder werden aus den Siebplatten gehoben und mit dem gesamten Bodenmaterial waagerecht zum Trocknen bei 105°C auf eine Schale gelegt. Die trockenen Proben werden mit der zugehörenden Siebplatte (nummerieren!) und dem befeuchteten Filterpapier gewogen:

Mtr i = Probe (trocken) + Stechzylinder + Siebplatte + Filterpapier (nass)

Anschließend wird die Bodenprobe entfernt und die Taramasse ermittelt:

Mtara i = Stechzylinder + Siebplatte + Filterpapier (nass)

Das Gewicht der Schalen ist zu berücksichtigen.

Der Wassergehalt Mwi bei Sättigung am Versuchsbeginn ist gegeben durch die Differenz:

Mwi = Ms i - Mtr i

Das Volumen der Probe mit den Tensiometerbohrungen beträgt 245 cm³. Der volumetrische Wassergehalt der Probe bei Versuchsbeginn errechnet sich zu:

$$W_i(Vol\%) = 100 * \frac{M_{wi\,(g)}}{245} \qquad \textbf{(5)}$$

Dieser Anfangswassergehalt verringert sich bei jedem Versuchsschritt. Der Gesamtwasserverlust bis zum Schritt n beträgt:

$M_0 - M_n$

M_0 aufgezeichnete Masse der Probe bei Abnahme des Deckels (g)

M_n aufgezeichnete Masse der Probe nach Zeitschritt n in (g)

Der Wassergehalt einer betrachteten Probe i nach dem Schritt n ist demnach:

$$W_n(Vol\%) = 100 * \frac{M_{w\,(g)} - (M_0 - M_n)}{245} \qquad \textbf{(6)}$$

Mit dieser Formel wird für jede Probe eine Spalte für den Wassergehalt in % gebildet.

pF-Stufe:

Der pF-Wert (LOG10 der Wasserspannung in cm) wird aus den Tensiometerwerten gebildet:

pF = LOG10 ((Tens1+Tens2) / 2)

Fließgeschwindigkeit:

Die Fließgeschwindigkeit in Probenmitte errechnet sich nach Gl. 3.

Mit der Querschnittsfläche der Probe von 41 cm² berechnet sich die Fließgeschwindigkeit während einer Messperiode zu:

$$v = \frac{1}{2} * \frac{\Delta M * 60}{41 * \Delta t} \quad \text{(cm/h)} \qquad \textbf{(7)}$$

ΔM ist die Differenz aufeinanderfolgender Messwerte aus der Spalte Masse der Probe.

ku-Wert:

Der ku-Wert in cm/h wird durch Division der Werte aus den Spalten Fließgeschwindigkeit und Gradient gebildet.

ku = Fließgeschw. / Gradient (cm/h)

Δt = Zykluszeit (cycletime)

Mit den berechneten Spalten können die

- pF- Kurve : pF-Stufe über Wassergehalt
- ku-Funktion: ku-Wert über Wassergehalt

dargestellt und an analytische Ausdrücke angepasst werden.

Die **Trockendichte** der jeweiligen Bodenprobe beträgt:

$$p_i = \frac{m_{tr\,i} - m_{tara\,i}}{245\ cm^3} \qquad \textbf{(8)}$$

Für eine vollständige Darstellung der ku-Funktion ist die Einbeziehung des kf-Wertes (gesättigte hydraulische Leitfähigkeit) erforderlich. Der kf-Wert kann an den Stechzylinderproben mit dem Haubenpermeameter nach HARTGE oder im getrennten Feldversuch mit dem Haubeninfiltrometer IL-2700 ermittelt werden (siehe UGT-Produktpalette).

Eine alternative Auswertung der Versuchsdaten kann über inverse Simulation erfolgen.

Dabei entfällt die Annahme eines linearen Verlaufes der Wasserspannung über der Probenlänge.

Im Softwarepaket befinden sich Tools zur Berechnung.

11. Literatur

MINASNY, B. & D. FIELD (2004):

INVERSE MODELLING OF THE EVAPORATION METHOD FOR ESTIMATING SOIL HYDRAULIC PROPERTIES USING STOCHASTIC SIMULATION. POSTER AT EUROSOIL 2004. FREIBURG I. BREISGAU. GERMANY.

MINASNY, B. & A. B. MCBRATNEY (2000):

ESTIMATION OF SORPTIVITY FROM DISC-PERMEAMETER MEASUREMENT. IN: GEODERMA 95:305-324.

PLAGGE, R. (1991):

BESTIMMUNG DER UNGESÄTTIGTEN HYDRAULISCHEN LEITFÄHIGKEIT IM BODEN. IN: BODENÖKOLOGIE UND BODENGENESE. NO. 3. BERLIN.

SCHINDLER, U. (1980):

EIN SCHNELLVERFAHREN ZUR MESSUNG DER WASSERLEITFÄHIGKEIT IM TEILGESÄTTIGTEN BODEN AN STECHZYLINDERPROBEN.

12. Hinweise

Beim Umgang mit dem ku-pF Apparat ist folgendes zu beachten:

- *Vor Inbetriebnahme unbedingt den freien Drehbetrieb gewährleisten!*
- *Jede Zuglastung an den Datenkabeln ist unbedingt zu vermeiden!*
- *Jede Hublastung am Drehkreuz bzw. der Wägeplattform ist unbedingt zu vermeiden!*
- Die Wägeplattform ist im Untermenü "Tools" durch zweimaliges Betätigten des Buttons "Lift up" in die Messposition zu überführen.
- Positionieren sie die Apparatur eben. Richten Sie die Waage aus.
- Vor Versuchsbeginn sind die Transporthülsen der Tensiometer gegen entsprechend offene Behälter (Lieferumfang) auszutauschen. Füllen Sie diese randvoll mit (bi-) destilliertem Wasser.
- Beim Befüllen der Tensiometer darf kein Wasser in die Handvakuumpumpe gelangen.
- Kontrollieren Sie vor jeder Onlinedarstellung der Referenzwerte die Schlauchverbindungen. Es darf kein Wasser eingeschlossen sein.
- Sättigung der "ungebohrten" Proben:
    - im Wasserbad bis Oberkante Siebboden für mind. 12 Stunden
    - anschließend bis zur Probenmitte auffüllen; weitere 12 Stunden
- Vergessen Sie nicht, die gesättigten Proben zu wiegen.
- **Achtung!** Nach dem Installieren der Tensiometer unbedingt die Transporthülsen entfernen.
- Beachten Sie, dass nach dem Einsetzen der Tensiometer osmotische Prozesse zwischen dem Bodenwasser und der Tensiometerfüllung nicht auszuschließen sind.
- Mittels Online- Darstellung unmittelbar vor dem Versuchsbeginn die Tensiometer auf "Zero"- und "Referenz"-Wert testen. Gegebenenfalls mittels Olive und Handvakuumpumpe aus dem Wasserbad heraus befüllen. In Ausnahmefällen kalibrieren.
- Starten Sie den Versuch mit Lochfolie und Deckel. Laufzeit ca. 3 Stunden.
- Anschließend beides entfernen und am Träger bzw. auf dem Drehkreuz positionieren. Beginn der Verdunstung!
- Entscheiden Sie nach den ersten 12 Stunden, ob ein Verdunstungsschutz erforderlich
- ist. Gegebenenfalls Lochfolie auflegen.
- Vermeiden Sie während der Messung jede Belastung des Messplatzes.
- Vermeiden Sie Zugluft bzw. Schwankungen der Raumtemperatur.
- Nach Versuchsende (Lufteintritt im Tensiometer "top") die Tensiometer umgehend aus den Bodenproben entfernen und in (bi-) destilliertem Wasser spülen. **Die Keramiken dürfen nicht abgewischt werden.** Zur Reinigung empfiehlt sich ein Ultraschallbad. Stark verschmutzte Keramiken können gegebenenfalls in 10 %iger Salzsäure (HCl) gespült werden. Zu diesem Zweck den Kerzenschaft vorsichtig herausdrehen und dabei beachten, dass die Keramik nicht berührt wird. Im Anschluss daran sind die Tensiometer unbedingt mit (bi-) destilliertem Wasser zu spülen.